



<http://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/index>

ISSN do Livro de Resumos: 2448-0010

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO CRISTALINO: UMA ANÁLISE SOBRE SUA COMPOSIÇÃO E RECICLAGEM

*Karolaine Aguiar dos SANTOS<sup>1</sup>, Fabiano Perin GASPARIN<sup>2</sup>, Lúcia Allebrandt da Silva RIES<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), <sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

E-mails: [karolaine-santos@uergs.edu.br](mailto:karolaine-santos@uergs.edu.br); [fabiano.gasparin@ufrgs.br](mailto:fabiano.gasparin@ufrgs.br); [lucia-ries@uergs.edu.br](mailto:lucia-ries@uergs.edu.br)

### Resumo

O aproveitamento da energia solar é uma alternativa promissora de energia renovável, limpa e sustentável. O elevado potencial brasileiro para geração de energia solar fotovoltaica impulsiona o crescimento de usinas fotovoltaicas no país. Apesar das inúmeras vantagens que essa tecnologia apresenta, os módulos fotovoltaicos têm um tempo de vida útil limitado, e quando descartados incorretamente geram altos impactos ambientais gerados pela lixiviação de metais pesados, bem como perda de recursos. Dessa forma, esse trabalho se propôs a analisar e avaliar a composição dos módulos fotovoltaicos de silício cristalino, os impactos do descarte incorreto desses equipamentos e os benefícios para a reciclagem.

### INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o Brasil se destaca como um país com alto percentual de fontes renováveis de energia em sua oferta interna (Atlas de Eficiência Energética, 2020). Segundo o balanço energético nacional de 2021, elaborado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), as hidrelétricas têm sido a principal fonte de energia renovável do Brasil por várias décadas. Em 2020, a fonte hídrica correspondeu a 65,2% da matriz elétrica brasileira, porém apresentou uma queda de 0,4% em relação ao ano anterior. Nos últimos anos, o Brasil presenciou perdas significativas de potencial hidrelétrico, as quais estão diretamente relacionadas às alterações das condições climáticas do país que causam a redução do fluxo dos rios (HUNT et al., 2021). Neste contexto, a energia solar fotovoltaica (FV) surge como um importante apoio para o sistema elétrico brasileiro, dado que o país detém elevado potencial de incidência de radiação solar. A ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, estima que em 2024 haverá 886 mil sistemas de energia solar FV conectadas à rede elétrica brasileira. Dentro desse contexto, o estado do Rio Grande do Sul encontra-se em 3º lugar no ranking de potência instalada de sistemas de energia solar FV em geração distribuída, com cerca de 785,0 MW, em agosto de 2021, o que corresponde a 12,4% de potência total instalada no país (ABSOLAR, 2021). As inúmeras vantagens do emprego de sistemas de energia solar FV são indiscutíveis, é um sistema de geração de energia relativamente barato, com funcionamento garantido de pelo menos 25 anos, sendo baseado na conversão direta da energia solar em energia elétrica. Além disso, a tecnologia das células que compõe o módulo FV (popularmente chamado de painel fotovoltaico) permite que essa conversão ocorra sem gerar qualquer tipo de resíduo poluente durante a operação dos módulos, como a emissão de gases de efeito estufa. Segundo a ABSOLAR, com a geração de energia FV, em 2021, 10,7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> deixaram de ser emitidas no Brasil. Apesar dos benefícios, estudos apontam uma enorme quantidade de módulos obsoletos nos próximos anos. Estima-se para o cenário Europeu em 2036, cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos (PADOAN et al., 2019). A significativa quantidade



<http://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/index>

**ISSN do Livro de Resumos: 2448-0010**

de resíduos gerados pelos módulos FV no descomissionamento das usinas e sistemas fotovoltaicos vem chamando a atenção da comunidade científica. Segundo LUNARDI et al. (2018), apenas 10% dos módulos FV são reciclados no mundo todo.

Nesse cenário, torna-se nítida a necessidade de elaborar um plano de descarte e reciclagem para os componentes dos módulos FV. No plano nacional de energia 2050 (PNE 2050), um dos objetivos citados é elaborar, até 2040, a regulação para a reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico. No Brasil, por não ter se cumprido ainda o fim do tempo de operação da maioria dos módulos instalados, ainda se dispõe de tempo para propor alternativas de gestão e prevenção de impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos módulos FV. Sendo assim, este trabalho se propõe a realizar uma discussão teórica acerca dos componentes do módulo FV, os problemas gerados pelo descarte incorreto e os benefícios da reciclagem desses componentes.

## **METODOLOGIA**

Trata-se de um trabalho de análise e pesquisa bibliográfica, referindo-se às publicações de periódicos internacionais, com alto fator de impacto, dos últimos cinco anos, e que estabelecem o estado da arte no tema. Além disso, as análises e projeções da energia solar fotovoltaica foram realizadas a partir da documentação disponibilizada pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE, pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR e pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Historicamente, os módulos FV de silício cristalino têm sido a tecnologia mais empregada para a conversão fotovoltaica da energia solar, e estão presentes na maioria dos sistemas fotovoltaicos existentes atualmente. Segundo a ISE (Institute of Solar Energy), em 2020, cerca de 95% da produção global do mercado fotovoltaico correspondeu a tecnologia de módulos FV de silício cristalino, e cerca de 84% desses módulos eram compostos por células de silício monocristalino.

As células de silício cristalino são os componentes mais relevantes dos módulos, e podem ser de silício monocristalino ou policristalino. Além das células de silício, os módulos FV apresentam os seguintes componentes: moldura de alumínio, vidro temperado, camadas encapsulantes de EVA (acetato-vinilo de etileno ou etileno acetato de vinila), filamentos de cobre revestidos por chumbo e estanho, contatos metálicos (de prata e alumínio), backsheet ou fundo protetor de PVF (fluoreto de polivinila ou tedlar) e caixa de junção (DIAS et al., 2021). Na figura 1, é possível observar a disposição dos diversos componentes do módulo FV.

<http://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/index>

ISSN do Livro de Resumos: 2448-0010

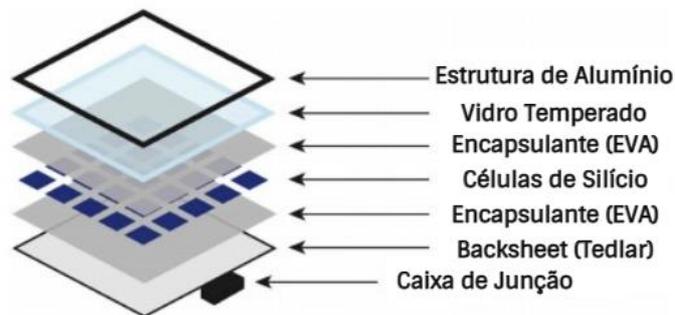


Figura 1 – Disposição dos diferentes componentes do módulo FV de silício cristalino. Adaptado de FARREL et al., 2020.

Os componentes que basicamente atuam como proteção do módulo FV são: estrutura de alumínio, vidro temperado, camadas encapsulantes e *backsheet*. A moldura de alumínio confere resistência e leveza para a estrutura do módulo; o vidro temperado, por sua vez é responsável por proteger os componentes internos de ações externas e por permitir a passagem da luz solar para as células com alta transmissividade; as camadas encapsulantes, atuam contra os efeitos de degradação causados por adventos climáticos; e o *backsheet* confere a proteção traseira do módulo.

As células de silício são formadas a partir de lâminas de silício de elevada pureza (99,9999%), dopadas com boro e fósforo com a finalidade de formar uma região semicondutora tipo-p e uma região semicondutora tipo-n, respectivamente. Esta junção semicondutora PN é responsável pelo efeito fotovoltaico, isto é, pela conversão da energia solar diretamente em energia elétrica. Além disso, as células apresentam: uma camada antirreflexiva em sua superfície, filamentos de cobre revestido por estanho e chumbo, e contatos metálicos frontais e traseiros, geralmente de prata e alumínio, que permitem o fluxo de elétrons.

A caracterização dos componentes formadores do módulo FV é de extrema relevância para o planejamento da reciclagem, e para o dimensionamento dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos mesmos, como a contaminação do solo e da água pela lixiviação de metais pesados. Além dos efeitos da contaminação causados pelo descarte incorreto, é indispensável salientar as perdas de material com alto valor agregado e de alto impacto ambiental nos processos de extração e fabricação, como silício de alta pureza, prata e cobre, que não sendo reutilizados aumentam o impacto ambiental, econômico e social na cadeia produtiva global.

Uma recente análise econômica realizada na China com os resíduos dos módulos FV quantificou os materiais residuais em termos de benefícios gerados para a reciclagem. O estudo concluiu que o vidro, responsável por cerca de 65-75% da massa total do módulo, apresenta um baixo benefício para a reciclagem (cerca de apenas 6%). Por outro lado, materiais como alumínio, silício e prata, que representam cerca de 21% da composição total, geram um alto benefício (cerca de 90%). Dessa forma, além da proteção ambiental, a recuperação e reciclagem de materiais com valor econômico possibilita a economia circular dos mesmos, servindo para a produção de novos produtos e agregando valor.



<http://pev-proex.uergs.edu.br/index.php/xsiepex/index>

ISSN do Livro de Resumos: 2448-0010

## CONCLUSÃO

O potencial da energia solar no Brasil é expressivo e o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica é crescente. Seguindo as estimativas globais, é esperado um elevado número de módulos fotovoltaicos obsoletos nos próximos anos, o que poderá gerar um grave problema de gestão de resíduos sólidos. Atualmente não há legislação brasileira específica para a reciclagem de módulos fotovoltaicos, e ainda se desconhece quando ocorrerá um descarte significativo destes equipamentos no momento do descomissionamento de usinas e sistemas. Desta forma, fica evidente a necessidade de elaboração de estimativas de descarte, planejamento e desenvolvimento de metodologias de reciclagem dentro do contexto nacional, minimizando os impactos ambientais, econômicos e sociais gerados por um descarte incorreto.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. ([http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica\\_0056\\_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9)). Acessado em 07/09/2021.
- ABSOLAR** – Agência Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2021. (<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>). Acessado em 07/09/2021.
- DIAS, P., SCHMIDT, L., LUNARDI, M. M., CHANG, N. L., SPIER, G., CORKISH, R., & VEIT, H.** (2021). Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination—technical, environmental and economic analyses. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105241.
- EPE** – Empresa de Pesquisa Energética, Atlas de Eficiência Energética – Brasil, 2020. (<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2020>). Acessado em 07/09/2021.
- EPE** – Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional – Brasil, 2021. (<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>). Acessado em 07/09/2021.
- FARRELL, C. C., OSMAN, A. I., DOHERTY, R., SAAD, M., ZHANG, X., MURPHY, A., & ROONEY, D. W.** Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 128, p. 109911, 2020.
- HUNT, J. D., NASCIMENTO, A., TEN CATEN, C. S., TOMÉ, F. M. C., SCHNEIDER, P. S., THOMAZONI, A. L. R., & SENNE, R.** (2021). Energy crisis in Brazil: Impact of hydropower reservoir level on the river flow. *Energy*, 121927.
- ISE** - Institute of Solar Energy, *Photovoltaics Report*, with support of PSE Conferences & Consulting GmbH Freiburg, 27 July 2021. (<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>). Acessado em 07/09/2021.
- LIU, C., ZHANG, Q., WANG, H.** Cost-benefit analysis of waste photovoltaic module recycling in China. *Waste Management*, v. 118, p. 491-500, 2020.
- LUNARDI, M. M., ALVAREZ-GAITAN, J. P., BILBAO, J. I., & CORKISH, R.** (2018). A review of recycling processes for photovoltaic modules. *Solar Panels and Photovoltaic Materials*, 9-27.
- PADOAN, F. C., ALTIMARI, P., & PAGNANELLI, F.** (2019). Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. *Solar Energy*, 177, 746-761.